

CMA-MESO 逐时快速更新同化预报系统 及其短临预报效果初步分析¹

庄照荣^{1, 2} 江源^{1, 2} 田伟红^{1, 2} 黄丽萍^{1, 2} 李兴良^{1, 2}

1 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

摘 要 基于 CMA-MESO 水平 3km 分辨率 3h 循环的快速更新同化预报系统, 本文建立逐小时的分析预报循环系统, 并且通过采用 5 种尺度叠加的高斯相关模型和引入各向异性的水平相关尺度方案来改进背景误差水平相关结构, 同时考察引入全球大尺度信息方案对逐小时循环的分析和预报影响。通过对 2020 年 7 月 19 日华东强对流天气过程的数值模拟表明: (1) 逐小时循环吸收了更多的高频观测资料和循环中采用更临近的 1h 预报场作为背景场, 分析和降水短临预报质量整体比 3h 循环有所提高; (2) 在区域分析中逐时引入全球预报场的大尺度信息会削弱区域观测资料的影响, 对预报会有不利影响; (3) 改进的五种尺度叠加高斯相关模型和各向异性的水平相关尺度主要使风场背景误差水平相关系数的描述更接近样本的统计结果, 因而在逐 1h 循环中风场分析场更靠近观测, 华东强对流过程的组合反射率和降水短临预报更接近实况。

关键词 CMA-MESO 逐时快速更新同化预报 短临预报 强对流 背景误差协方差

文章编号 中图分类号 P435 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2206.21090

The short-term forecasting of severe convection weather process at Eastern China with hourly rapid analysis and forecast system of CMA-MESO

ZHUANG Zhaorong^{1, 2}, JIANG Yuan^{1, 2}, TIAN Weihong^{1, 2}, HUANG Liping^{1, 2}, LI

¹ 收稿日期 2021-5-29; 网络预出版日期

作者简介 庄照荣, 女, 1978 年出生, 正高级工程师, 主要从事资料同化研究, E-mail: zrzhuang@cma.gov.cn

通讯作者 李兴良, E-mail: lixiliang@cma.gov.cn

资助项目 河南省重大科技专项 201400210800、国家重点研发计划资助 2021YFC3000902

Funded by Major science and technology projects of Henan Province(201400210800), National Key Research and Development Program of China(Grants 2021YFC3000902)

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Based on the CMA-MESO horizontal 3km resolution 3h cycle rapid update assimilation and forecast system, an hourly cycle analysis and forecast system, in which the background error correlation structure by adopting a Gaussian correlation model with 5 scales superimposed and introducing an anisotropic correlation scale scheme is improved and the impact of introducing global large-scale information scheme on the analysis and forecast of hourly cycle is examined, has been established. Numerical simulations of the strong convective case in eastern China on July 19, 2020 show that: (1) The hourly cycle absorbs more high-frequency observations and uses the more proximate 1-h forecast field as the background field in the cycle, which improves the quality of analysis and short-range forecasts compared to the 3h cycle; (2) The introduction of large-scale information from the global forecast field into the hourly cycle regional analysis can weaken the influence of regional observations, which can have a negative impact on the forecasting; (3) The improved five-scale superimposed Gaussian correlation model and the anisotropic horizontal correlation scale make the representation of the background error horizontal correlation coefficients of wind variables closer to the statistical results of the samples, and thus the analyzed fields of wind are closer to the observations in the hourly cycle, and the Composite reflectivity and precipitation short-term forecasting of the strong convective process in eastern China are closer to the real situation.

Key words CMA-MESO, Hourly Rapid Analysis and Forecast System, short-term forecasting, severe convection, background error covariance

1 引言

针对中小尺度灾害性天气预报的需求, 近几年高分辨率区域快速更新循环同化系统发展较快, 该系统不仅能充分利用时空高频的观测资料提高模式初始场质量, 而且在短临预报上有重要作用。美国在 1994 年开始业务运行基于最优插值分析的 3h 循环 60km 分辨率的快速更新系统(RUC: Rapid Update Cycle), 2002 年分辨率提高到 20km 和 1h 循环, 试验表明风

场和温度场较短预报时效的预报质量明显比较长预报时效的好 (Benjamin et al, 2004)。2005 年 RUC 系统升级到三维变分, 分辨率提高到 13km, 探空观测, 风廓线观测、GPS PW 可降水和地面观测对短期预报技巧的提升有较明显正影响 (Benjamin et al, 2010)。随后 2012 年建立了基于混合变分集合同化的快速更新系统(RAP:Rapid Refresh), 随着版本升级, 到 2015 年 RAP 的预报技巧持续上升 (Benjamin et al, 2016)。英国气象局在四维变分同化系统的基础上建立了 1.5 公里 1 小时循环的短临预报系统 (NDP: Nowcasting Demonstration Project), 其降水预报质量显著优于基于三维变分 1.5 公里 3 小时循环系统 (Ballard, et al, 2016)。法国也研发了 1.3 公里逐 1 小时快速更新的对流尺度数值预报系统, 由于此系统能同化包含更多中尺度信息的观测, 提供更精确的初始场, 因而提供的降水预报质量更好 (Brousseau, et al, 2016)。由上可知, 快速更新循环系统的改进不仅包含分析预报技术的提高, 还有分辨率的提高和高频高密观测资料同化频次的提高。

我国各区域研究中心在 2000 年后也开展快速更新分析预报系统的研究, 各自利用不同的分析和模式预报系统建立逐 3/1 小时的更新循环系统。2007 年北京城市气象研究所基于 WRF 三维变分和模式系统建立的针对北京地区三重嵌套网格 ($27\times9\times3\text{km}$) 的逐 3h 更新快速循环同化预报系统 (BJ_RUC) 进入准业务运行 (范水勇等, 2009); 随后发展了针对大尺度和小尺度观测二重嵌套网格 ($9\times3\text{km}$) 的逐 1 小时循环的分步同化方案, 试验表明对北京 2009 年夏季四次强降水预报质量有明显改善 (童文雪等, 2018)。广州热带气象研究所基于 GRAPES(global/regional assimilation and prediction system) 等压面三维变分 (张华等, 2004; Xue et al, 2008) 和区域模式系统 (Chen et al, 2008; Zhang and Shen, 2008) 建立了针对华南地区的逐时同化分析与模式预报循环系统 (GRAPES_CHAF: GRAPES Cycle of Hourly Assimilation and Forecast, 陈子通等, 2010)。上海区域中心建立以 ADAS 和 WRF 模式为基础的 3km 分辨率逐小时同化的快速更新同化预报系统 (SMB_WARR: Shanghai Meteorological Bureau-WRF ADAS Rapid Refresh System, 陈葆德等, 2013)。傅娜等 (2013) 在 SMB_WARR 的基础上, 采用时间滞后方法进行针对降水过程的集合预报, 李佳等 (2017) 在第二代华东快速更新循环同化模式 (SMS-WARRV2.0) 的基础上模拟了 2016 年在江苏阜宁发生的龙卷, 表明 3km 分辨率逐小时循环同化对此次龙卷天气的模拟起着关键作用。李红莉和王志斌 (2017) 在基于 LAPS (Local Analysis and Prediction System) 和 WRF 建立的华中区域快速循环同化预报系统 LRUC 基础上进行 5km 分辨率逐 3h 同化的地面资料和雷达观测资料试验, 研究其对华中区域主汛期预报降水的影响。

中国气象局国家气象中心基于自主研发的区域 GRAPES 系统发展的快速更新循环系统伴随着分析和模式预报技术的更新和分辨率的提高而进行了几次业务升级。2010 年基于 GRAPES_CHAF 系统,采用模式面三维变分分析(马旭林等, 2009)和 GRAPES 模式 V3.0 建立的全局区域 15km 分辨率 31 层 3h 循环的 CMA-MESO(Rapid Analysis and Forecast System)进入准业务运行(郝民等, 2011; 徐枝芳等, 2013)。2014 年 CMA-MESO 水平分辨率升级到 10km, 垂直分层 50 层, GRAPES 模式版本升级为 V4.0, GRAPES 区域模式系统升级后模式要素场和降水预报都有明显改进(黄丽萍等, 2017)。2020 年, 全局区域水平分辨率 3km 3h 循环的快速更新循环系统业务运行, GRAPES 模式版本升级为 V5.0, 增加了雷达径向风、风廓线雷达等高频观测资料的同化。

全局 CMA-MESO 分析预报循环系统经过近十年的发展, 分辨率从 15km 升级为 3km, 短临预报技术逐年提升。但是观测资料的同化频率还是每 3h 同化一次, 对于分钟级别的雷达观测资料来说, 高频观测资料的利用效率较低。因而本文在业务 3km 分辨率 3h 循环系统的基础上建立逐 1 小时的快速更新循环系统。此外, 由于观测资料的水平传播结构依赖于背景误差水平相关模型, 水平传播的远近由水平相关尺度决定, 目前业务 GRAPES-MESO 5.0 版本中采用三种尺度叠加的高斯相关模型和观测信息全场均匀的传播方式, 背景误差的水平相关结构与统计样本相比还有一定差别, 所以文中通过增加更多的水平相关尺度参数, 以及采用各向异性的水平相关尺度方案改进背景误差水平相关模型。本文针对 2020 年 7 月 19 日的华东地区强对流过程进行了逐 3h 和 1h 循环的数值预报对比试验, 研究快速更新循环系统的短临预报效果。

2 CMA-MESO 快速更新循环系统

2.1 逐 1h 快速更新循环系统简介

CMA-MESO (原称 GRAPES-RAFS) 区域快速更新循环系统是基于区域 GRAPES 三维变分分析(3DVar)和区域中尺度数值预报模式建立起来的间歇快速分析预报循环系统(郝民等, 2011; 徐枝芳等, 2013), 主要模块包括观测资料预处理与质控、全局模式资料前处理、三维变分分析系统、云分析、模式标准初始化、数字滤波和中尺度数值模式。水平 3km 分辨率的 CMA-MESO 系统于 2020 年 6 月业务运行, 在 10km CMA-MESO 系统的基础上增加了陆面资料同化(王莉莉等, 2018)和混合尺度方案(庄照荣等, 2020)。CMA-MESO 系统结构流程如图 1a 所示, 其中蓝线表示全局模式提供冷启背景场、大尺度信息和侧边界信息, 红线表示暖

启过程，点线表示观测预处理和质控后提供的观测信息。本文在 3h 间隔同化观测（3h 循环）基础上建立了逐 1h 的循环系统。CMA-MESO 快速循环系统是非连续的间歇快速循环系统，每天在 00、12UTC（世界时）进行两次冷启，也就是每天进行两次 12h 的间歇循环过程，其中 00UTC 进行冷启的 12h 间歇循环过程（逐 1h 循环）如图 1b 所示。初始时刻为全球模式预报降尺度场作为背景场的冷启分析和预报（浅蓝曲线表示），其他 12 个时刻把区域 1h 预报场作为背景场进行暖启分析和预报（红曲线表示），侧边界条件和混合尺度分析的大尺度部分信息都来自全球模式的分析（蓝线表示）和预报（橘线表示）。

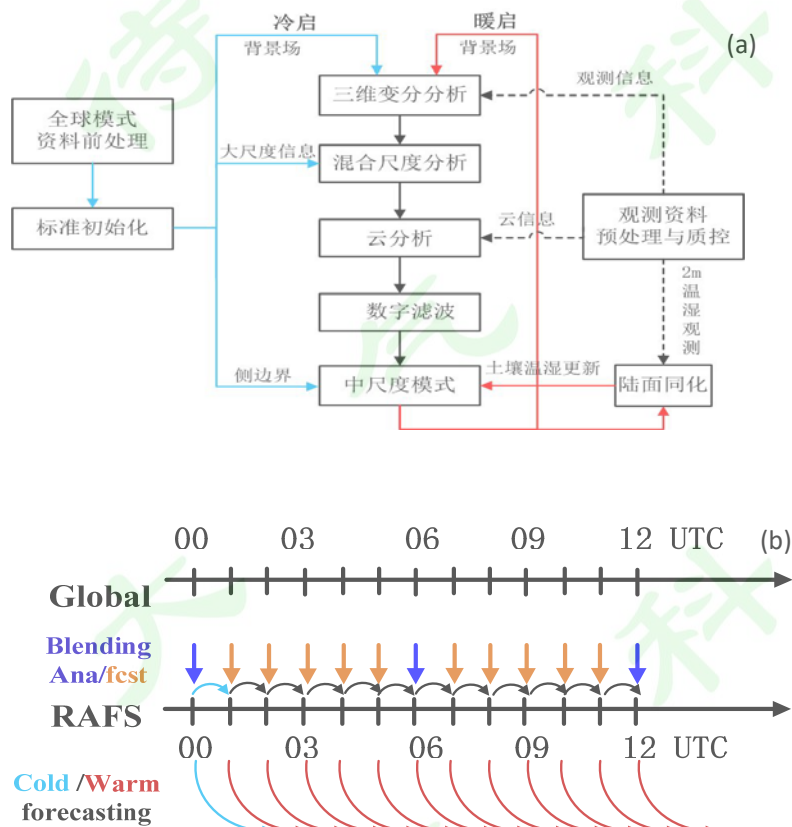


图 1 CMA-MESO 系统结构流程 (a) 和逐 1 小时循环示意图 (b)

Fig. 1 The flow diagram and schematic of hourly cycle Rapid Assimilation and Forecast System

2.2 混合尺度方案

在 CMA-MESO 中采用混合尺度方案，即每次区域分析后，全球分析或预报场的大尺度信息与区域的中小尺度信息结合起来形成新的初始场（庄照荣等，2018，2020）。3h 循环中，一次 12h 间歇循环过程的五次分析中有三次引入全球分析的信息和两次引入全球 3h 预报场的信息（例如 00-12UTC 的循环过程，00、06 和 12UTC 的分析，03 和 09UTC 的预报）。而对

于 1h 循环，一次 12h 间歇循环过程有 13 次分析，同样引入 3 次全球分析的大尺度信息（见图 1 蓝色箭头），其他 10 次引入了全球的预报场信息（见图 1 橘色箭头）。因而在逐 1h 循环中采用混合尺度方案后，由于引入全球预报信息的频次增多会对区域预报质量造成一定影响，所以文中测试了有无混合尺度方案对预报的影响。

2.3 3DVar 同化系统及改进

文中 CMA-MESO 3DVar 采用的控制变量为流函数、非平衡的势函数、非平衡的地面气压、非平衡的温度和比湿，背景误差协方差采用美国国家气象中心方法（NMC）统计获得，风压场的平衡关系依赖于线性统计回归关系（王瑞春等，2012），误差方差为随高度和纬度变化的二维场，垂直相关采用 NMC 方法统计的垂直相关系数，水平相关关系用高斯或者三种尺度叠加的高斯函数来描述（庄照荣等，2021b），水平相关尺度为随高度变化的一维场（庄照荣等，2019）。

2.3.1 背景误差水平相关模型的改进

在 3DVar 变分系统中采用高斯或者尺度叠加的高斯函数描述变量之间的水平相关，即：

$$R(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{r^2}{2(\alpha_i L)^2}\right) \quad (1)$$

式中 r 为两点间的距离， L 为水平相关尺度。 α_i 为尺度调节参数，当 $N=1$ ， $\alpha_1=1$ 时为单一尺度的高斯相关模型；当 $N=3$ 时，为三种尺度叠加的高斯相关模型，由于尺度叠加的高斯相关模型比单一高斯模型能更恰当地描述风场相关（庄照荣等，2021a, b），目前在 CMA-MESO 区域 3km 分辨率业务系统中主要采用此相关模型。

文中对控制变量水平相关系数样本采用公式（1）的高斯函数拟合获得水平相关尺度。统计数据来自 CMA-MESO 区域中尺度数值模式的预报产品，模式分辨率为 3 km，垂直层为 51 层，区域范围为 17°—50°N，102°—135°E。采用 2018 年 6 月 2 日—8 月 31 日 180 个预报样本（同一时刻不同时效 24 h 与 12 h 预报场的差）统计背景误差水平相关结构。

通过对比统计样本和拟合相关模型结构，增加五种尺度叠加的高斯相关模型方案。针对 30 层比湿和 v 风场变量进行统计水平相关样本及拟合函数的分析。由于区域边界的样本质

量受预报的侧边界条件的影响，因而只对区域（27.71°—38.96°N，112.71°—123.96°E）范围内所有格点与其他格点的每 10km 范围内计算平均距离和水平相关系数，其中 30 层比湿和 V 风场变量在纬向的水平相关系数样本分布如图 2 点线所示。从图 2a 中可以看出湿度样本的平均水平相关系数（黑色点线）基本符合高斯分布特征，统计水平相关系数样本通过高斯函数拟合后，计算出比湿的水平相关尺度为 100.6km，因而在 3DVar 分析系统中采用水平相关尺度为 100.6km 高斯模型来描述湿度的水平相关系数（图 2a 黑线）。比较湿度的高斯相关模型（图 2a 黑线）与统计的水平相关系数（图 2a 黑点线），可以看出在近距离 150km 之内高斯相关模型高估了湿度的水平相关系数，在远距离 150km 之外高斯相关模型低估了湿度的水平相关系数。采用三种尺度叠加的高斯相关函数，尺度调节参数 α_i 分别为 0.5，1.0 与 1.5，在近距离相关系数高估和远距离相关系数低估的现象大幅度缓解。若采用五种尺度叠加的高斯函数来拟合，尺度调节参数 α_i 分别为 0.3、0.5、1.0、1.5 和 1.7，拟合的水平相关函数结构最接近统计样本分布，拟合误差最小（图 2a、b）。

若流函数和势函数作为控制变量，不同水平相关模型导出的归一化拉普拉斯算子可以近似描述风场水平相关结构（庄照荣等，2021a）。统计的 V 风场水平相关系数样本分布如图 2c 点线所示，可以看出其在 400km 以外的远距离相关为 0 至 -0.1 以内的负相关。流函数统计样本通过高斯函数拟合，计算出流函数的水平相关尺度为 336.8km，当流函数变量的水平相关系数采用单一高斯模型来描述，导出的高斯函数归一化拉普拉斯算子描述的第 30 层 V 风场水平相关结构在近距离 300km 以内严重高估，以外负相关程度也严重高估，负相关可达 -0.4 以上。若对流函数变量的水平相关采用三种尺度叠加的高斯函数，尺度调节参数 α_i 分别为 0.5，1.0 与 1.5，高斯函数归一化拉普拉斯算子描述的风场水平相关高估的情况得到缓解，近距离相关与样本的误差最大从 0.35 左右降到 0.25；远距离相关与样本的误差最大从 -0.4 减小到 -0.2。若采用五种尺度叠加的高斯函数描述流函数变量的水平相关系数，尺度调节参数 α_i 分别为 0.4、0.5、1.0、1.2 和 2.3，其风场水平相关结构最接近样本统计结果，拟合误差在近距离减小到 0.2 以内，远距离相关与样本的误差基本介于正负 0.1 之内（图 2c、d）。

综上所述，通过采用五个尺度调节参数对远距离和近距离的水平相关系数进行调整，可以缓解控制变量近距离相关系数的高估和远距离相关系数的低估，同时使导出的风场变量相

关系数更加合理，拟合的相关模型更接近实际统计结果。

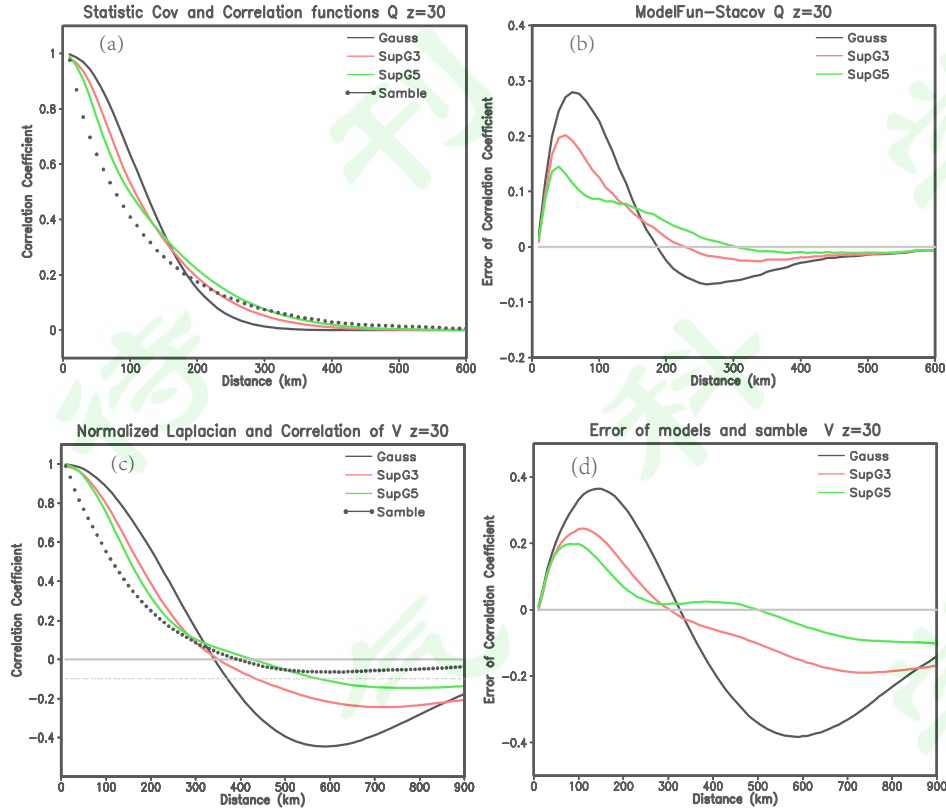


图 2 第 30 层比湿与 V 风场的水平相关模型 (a、c)，以及水平相关模型与统计样本的误差 (b、d)

Fig.2 Horizontal correlation models (a, c) and errors between correlation models and statistical samples (b, d) for specific humidity and V-component

2.3.2 背景误差水平相关尺度的改进

在 GRAPES 3DVar 中，背景误差水平相关尺度只随着高度变化，而统计结果表明在纬向和经向上不同变量的水平相关尺度有比较明显的差别。本文统计 3km 分辨率模式在不同方向的水平相关尺度，从图 3 可以看出非平衡温度、湿度和非平衡势函数，中高层在纬向的水平相关尺度明显大于经向的水平相关尺度。流函数在模式 17 层以下，纬向的水平相关尺度略大于经向的水平相关尺度；而在 17 层以上相反。从 U 和 V 风场的水平相关尺度可以看出（图 3b），在 40 层以下 U 风场在纬向的水平相关尺度明显大于经向；而 V 风场正好相反，在经向的水平相关尺度显著大于纬向。由于风场为矢量，因而造成风场在不同方向上的水平相关尺

度差别明显。

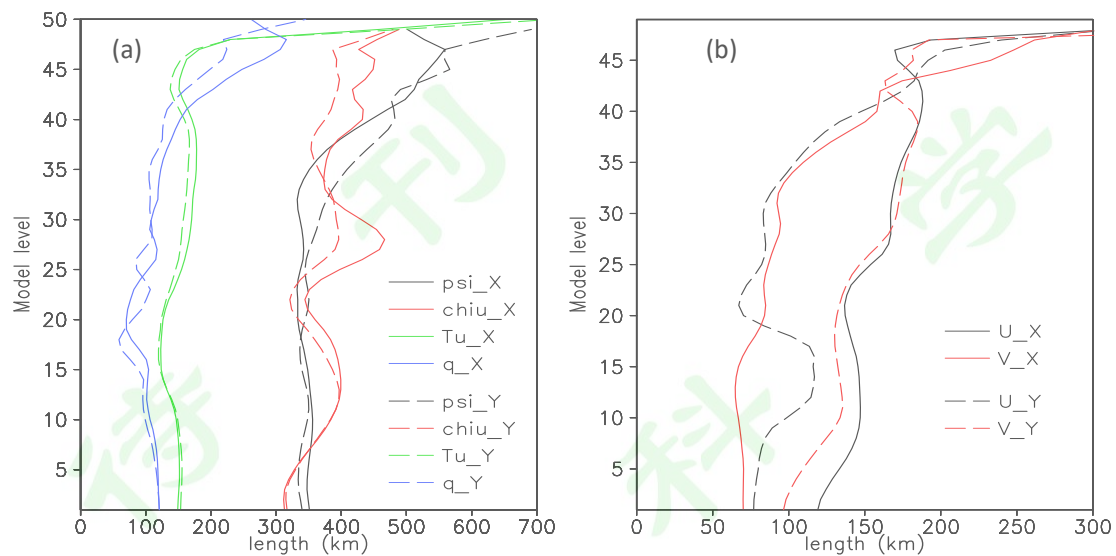


图 3 控制变量 (a) 与 u, v 风场 (b) 的水平相关尺度随高度和方向的变化(单位:km), 其中 X 表示纬向, Y 表示经向

Fig.3 Horizontal correlation lengths of control variables (a) and U/V -component (b) changes with height and direction (unit:km), X and Y denote zonal and meridional direction

综上所述, 在三维变分系统中通常假设变量的水平相关为各向同性, 即在不同方向上相同距离的背景误差水平相关相等, 而实际上不同变量在纬向和经向的水平相关系数有明显差别, 因而本文尝试在 3DVar 系统中采用纬向和经向不同的水平相关尺度方案。在 3DVar 系统中, 背景误差水平相关矩阵与某个向量的乘积用递归滤波来逼近。在水平二维情况下, 对于高斯相关模型, 它相当于两个独立纬向与经向滤波的乘积, 原方案纬向与经向采用同样的水平相关尺度下的滤波系数, 因而观测向四周的传播为各向同性; 本文引入各向异性的水平相关方案, 即在纬向和经向采用统计得到的不同水平相关尺度 (图 3a), 在纬向和经向的滤波过程中采用不同水平相关尺度导出的滤波系数, 从而使观测的传播在纬向和经向远近不同。

3 华东强对流天气过程及试验参数设置

3.1 华东地区强对流天气过程

文中针对 2020 年 7 月 19 日华东地区一次强对流过程进行模拟, 这次过程属于典型的梅雨锋过程。19 日 12UTC 的天气形势如图 4 所示, 可以看出 500 hPa 短波槽东移与北抬西进

的副热带高压相遇，长江中下游大部地区处于副高外围西南急流控制的高温高湿区，850 hPa 低涡位于渤海湾，低压槽后的偏北风与副热带高压外围的低空急流相遇形成切变线（图 4a）。250 hPa 高层华东地区处在明显的辐散区（图 4b）。以上天气形势场非常有利于对流系统发展，12-15UTC 的强降水（图 4 绿线）主要发生在切变线以南，冷暖空气交界处暖区低空急流区。

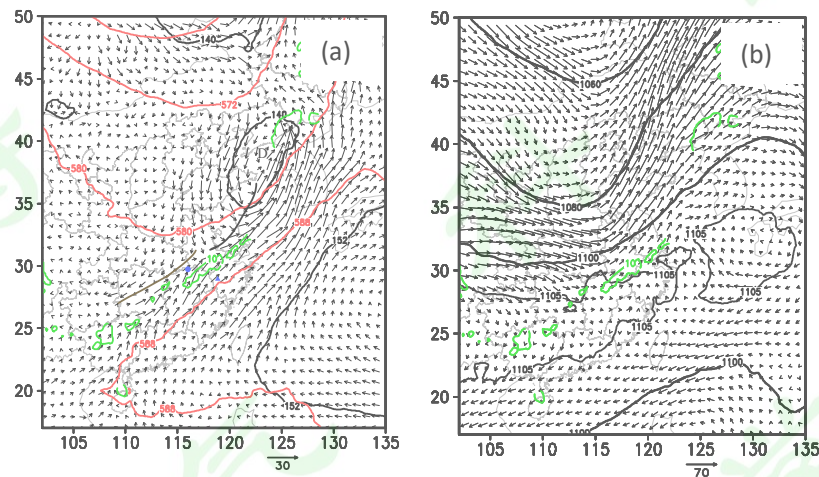


图 4 2020 年 7 月 19 日 12UTC 850 hPa (a) 和 250 hPa (b) 高度（黑线，单位：10gpm）和风场（风矢量，单位：m/s），500 hPa 高度（红线，单位：10gpm）以及 12-15UTC 降水（绿线，单位：mm），蓝色圆点为九江站，蓝色三角为衢州站

Fig.4 The geopotential height (black line,unit:10gpm) and wind (unit:m/s) on 850 hPa (a) and 250 hPa (b), the geopotential height (red line,unit:10gpm) on 500 hPa at 12UTC 19 July 2020 and accumulated precipitation forecast (green line,unit:mm) from 12UTC to 15UTC on 19 JULY 2020, blue dot is Jiujiang station and blue triangle is Quzhou station

从这次强对流过程中距离主体回波最近的江西九江（图 4 蓝色圆点）0.5° 仰角扫描图可以看出（图 5a、b），19 日 11:57UTC 主体回波跨度 400km，呈东北-西南走向，对流系统发展旺盛，最强回波达 45dBZ 以上；从径向风可以看出主体回波处在西南急流区，最大风速在 19m/s 以上。

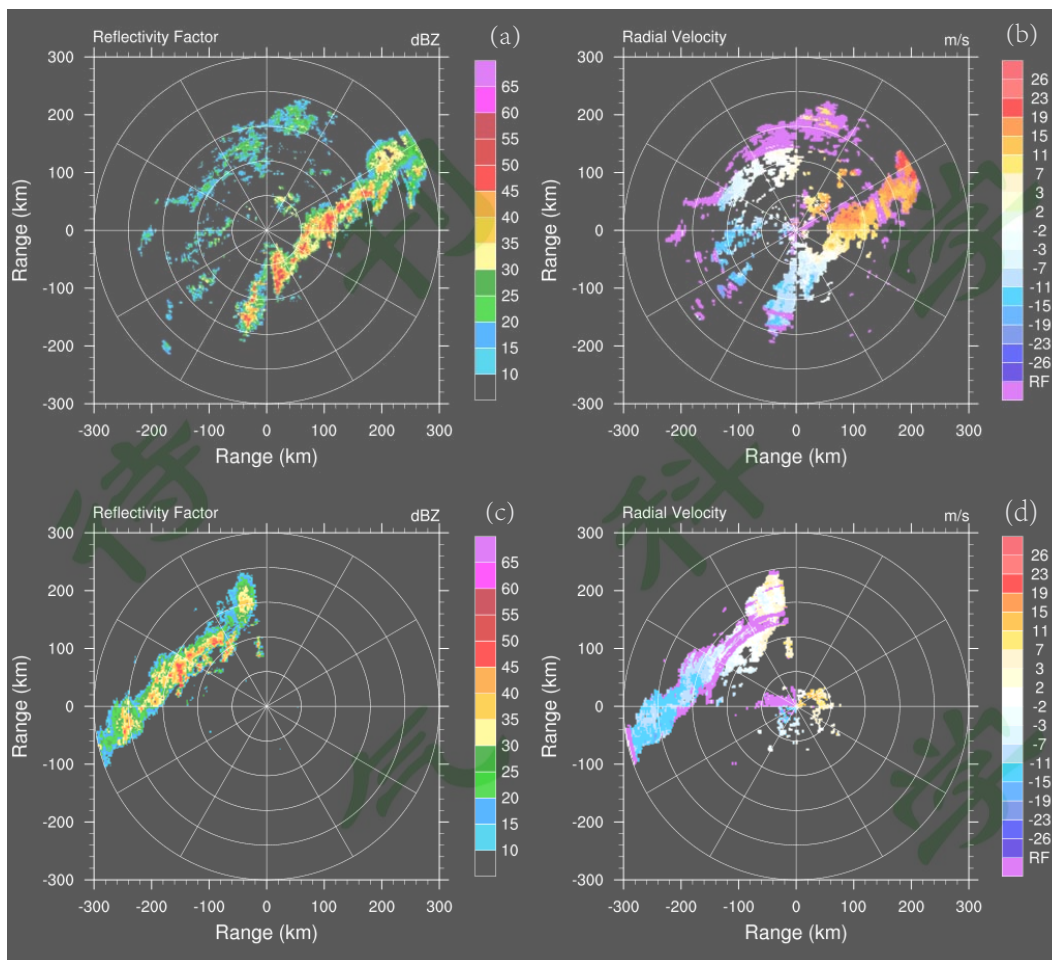


图 5 2020 年 7 月 19 日 11:57UTC 九江与 12:01UTC 衢州雷达的 0.5 仰角雷达反射率因子 (a、c) 与径向速度 (b、d)

Fig. 5 Radar reflectivity (a,c) and radial velocity (b,d) at 0.5 elevation for Jiujiang at 11:57 and Quzhou at 12:01 UTC 19 July 2020

从衢州雷达 0.5° 仰角扫描图也可以看出 (图 5c、d), 19 日 12:01UTC 主体回波出现在衢州西北侧, 呈东北-西南走向, 跨度 300km, 主体回波上对流单体发展旺盛, 最强回波达 45dBZ 以上; 从径向风也可以看出主体回波处在西南急流区, 最大风速在 15m/s 以上。

3.2 试验设置

文中采用 3h/1h 分析预报循环系统模拟这次强对流天气过程, 循环试验时段为 2020 年 7 月 19 日 00UTC-12UTC, 每次分析后进行 3h 短临预报, 试验范围为中国东部区域 (17°—50°N, 102°—135°E), 模式分辨率为 3 km, 格点数为 1101×1101, 垂直分层 51 层, 模式层顶达 33 km。采用 NCEP 全球模式产品提供冷启背景场、侧边界和大尺度信息, NCEP 全球模式的

分辨率为 50km，垂直方向 1000–10 hPa 共分 26 层。

采用 GRAPES-MESO 5.0 版本进行 5 组分析预报循环试验，第一组试验为采用 3h 循环间隔的控制试验（表示为 3h），试验设置基本与业务设置相同，即背景误差水平相关模型采用三种尺度叠加的高斯相关模型；背景误差水平相关采用各向同性、只随高度变化的相关尺度。分析循环中引入全球大尺度信息，并且采用云分析。第二组试验采用 1h 循环间隔（表示为 1h），其他设置与第一组相同。在第二组试验基础上，第三组试验没有引入全球大尺度信息（表示为 1hNoblnd）。在第三组试验基础上，第四组试验采用五种尺度叠加的高斯相关模型代替三种尺度叠加的相关模型（表示为 1hNoblndG5）。第五组试验在采用五种尺度叠加的高斯相关模型的同时，使用在纬向和经向上不同的水平相关尺度，即观测资料在纬向和经向的传播不同（表示为 1hHL2D）。试验设置见表 1。

表 1 快速更新循环试验列表

Table 1. List of RAFS experiments

试验名称	循环 间隔	是否引入大 尺度信息	水平相关模型
3h	3h	是	各向同性，三种 GAUSS 函数叠加
1h	1h	是	各向同性，三种 GAUSS 函数叠加
1hNoblnd	1h	否	各向同性，三种 GAUSS 函数叠加
1hNoblndG5	1h	否	各向同性，五种 GAUSS 函数叠加
1hHL2D	1h	否	各向异性，五种 GAUSS 函数叠加

3.3 观测资料

在五组试验中同化的观测资料包括探空（TEMP）、地面报（SYNOP）、船舶报（SHIPS）、飞机报（AIREP）、云导风（SATOB）、GPS 反演的可降水量（GPSPW）、掩星折射率（GPSREF）、雷达反演 VAD 风场（VAD）、风廓线雷达（WPR）和雷达径向风（VR）。图 6 为 2020 年 7 月 19 日 00UTC 1h 循环试验三维变分使用的观测资料分布情况。从图 5a 可以看出地面报（17764 个站点）、探空（110 个站点）资料主要分布在陆地，其中地面报资料包括国家站和区域自动站资料；这一时段飞机报资料（774 个站点）主要分布在韩国、日本等邻国和中国东部城市的航线上；云导风资料主要分布在海上和外蒙古地区（494 个站点），船舶资料最少（13 个站点）。从图 5b 可以看出 GPSPW 资料分布在我国陆地上（725 个站点），GPSREF 只有 22

个站点，VAD 雷达有 85 个站点，风廓线雷达有 77 个站，雷达径向风观测使用 122 部雷达。云分析使用了风云 2G 的亮温和云总量格点资料，以及雷达反射率格点资料。

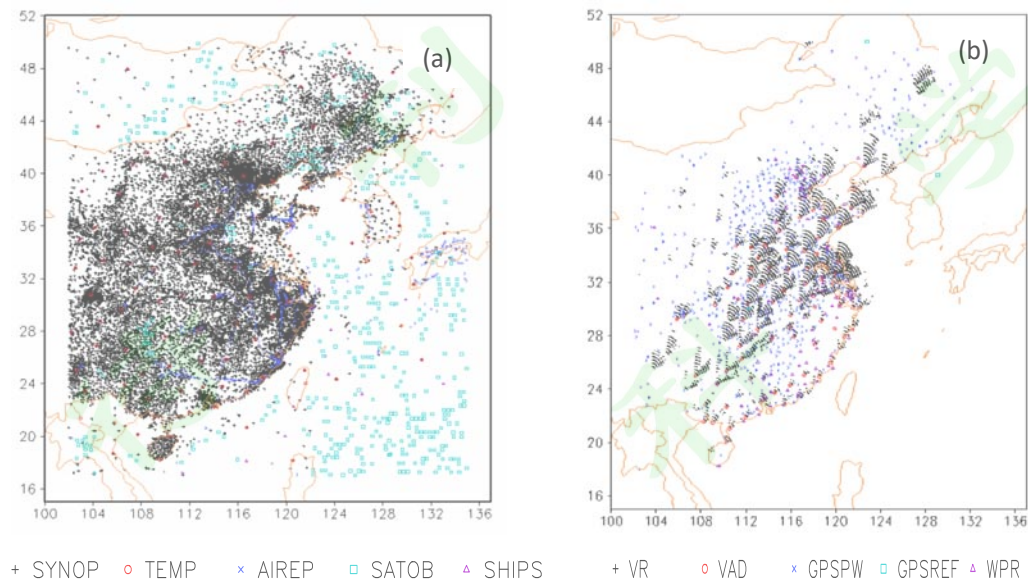


图 6 2020 年 7 月 19 日 00UTC GTS 传输的观测资料 (a) 和非常规观测资料 (b) 的分布
Fig.6 The distribution of GTS transferred data (a) and unconventional data (b) at 00UTC
on 19 July 2020

这次分析循环试验的观测资料使用份数见表 2 所示，3h 循环采用的观测资料与业务一致，1h 循环采用观测资料时间截断为正负半小时，各类观测中 U 和 V 变量按照一份资料统计。从表 2 可以看出，在 12h 循环时段内，使用份数最多的资料为地面站资料，1h 循环共使用 48.51 万份资料，3h 和 1h 循环份数也相差最大；其次是雷达径向风资料，1h 循环共使用 13.73 万份资料；随后是探空、飞机报与云导风资料。在 12h 循环时段内，3h 循环所同化的总观测份数为 35.84 万份；由于逐 1h 循环同化观测频次更高，1h 循环同化的总观测份数为 71.33 万份。1h 循环比 3h 循环主要增加的观测资料为地面报和雷达径向风，因而逐小时循环能更好利用雷达、地面报等高频次的观测资料。

表 2 CMA-MESO 3/1h 循环观测资料的使用情况

Table 2 Observations pieces used in 3/1 h cycling data assimilation of CMA-MESO

类型	00/12UTC		03/06/09UTC		其他分析时刻		总份数	
	3h	1h	3h	1h	3h	1h	3h	1h
TEMP	22386	25062	1183	1372	/	/	23569	26434
SYNOP	78528	78189	128441	127851	/	279155	206969	485195
SHIPS	77	63	90	82	/	119	167	264

AIREP	9888	4764	11794	5241	/	15900	21682	25905
SATOB	1381	1034	4264	3907	/	10891	5645	15832
GPSPW	1433	1411	1458	1425	/	/	2891	2836
GPSREF	1587	1575	1475	1478	/	4452	3062	7505
VAD	743	1017	1265	1829	/	4557	2008	7403
WPR	1973	1973	2674	2674	/	/	4647	4647
VR	34818	22283	53020	30140	/	84887	87838	137310
总份数	152814	137371	205664	175999	/	399961	358478	713331

3.4 噪音控制

在 CMA-MESO 循环过程中由于多频次引入的不规则观测信息会导致分析场不平衡，这种不平衡会在积分过程会产生虚假的重力波，从而影响预报的稳定性。系统中采用非绝热数字滤波方案进行分析噪音的控制，采用 30 分钟的滤波时间窗。若循环中引入全球大尺度的信息会使初始场变量之间更协调。

从五组试验暖启预报的地面气压倾向可以看出（图 7），包含混合尺度方案的 3h 和 1h 试验的地面气压倾向在前 3h 预报中相当，量级较小，变化也比较平缓。当不引入全球大尺度信息，1hNoblnd 试验的地面气压倾向起始最大，随着预报时效的增加略有下降，说明全球大尺度信息的引入会使初始场更加协调。1hNoblndG5 试验前 3h 预报的地面气压倾向略比 1hNoblnd 降低；而 1hHL2D 试验中也没有引入全球大尺度信息，初始场和 3h 预报内的地面气压倾向明显低于 1hNoblnd 试验，说明同时改进相关模型和水平相关尺度，观测资料的水平传播更加合理，相比 1hNoblnd 试验，分析场变量之间更加协调。

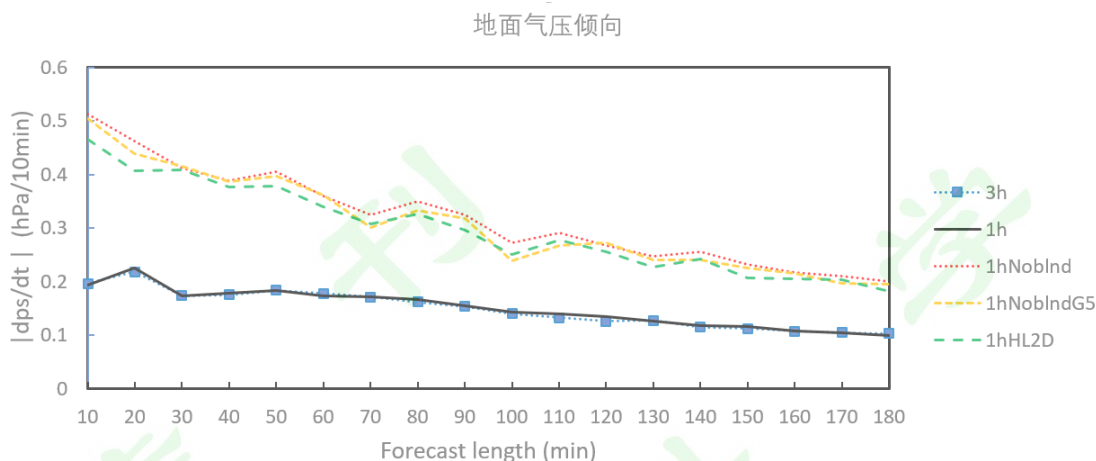


图 7 2020 年 7 月 19 日 12UTC 暖启起报的地面气压倾向

Fig.7 Surface pressure tendency starting from 12UTC 19 July 2020

4 数值试验结果

对五组逐 3/1 小时快速更新循环试验中的分析场进行分析诊断, 以及通过分析模式预报的动力场、组合反射率和降水来研究不同频率循环和分析框架改进对分析和预报质量的影响。

4.1 同化分析检验

4.1.1 分析的均方根误差

在循环过程中, 利用分析残差 (观测与分析的差), 比较分析与各类观测的差别可获得分析的均方根误差。由于 3h 和 1h 循环试验的同化时间窗的差别, 两类循环试验的观测资料样本数量差别 (表 2) 可能会造成分析检验不够客观。

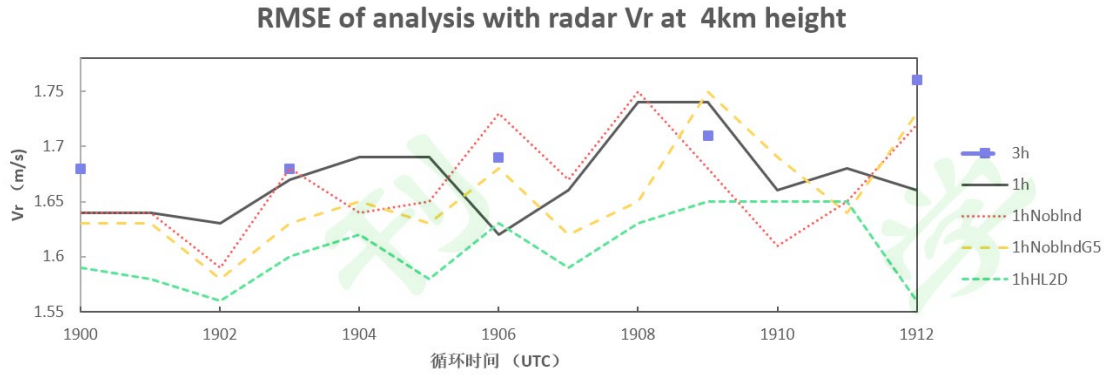


图 8 同化循环过程中 4km 高度的分析与雷达径向风观测的均方根误差，单位：m/s

Fig.8 Standard deviation (unit:m/s) of analyses with radar velocity observations at 4km height during cycling data assimilation

从 4km 高度分析与雷达径向风观测相比较的分析均方根误差可以看出（图 8），在整个循环时段，3h 试验分析均方根误差基本为最大；进行 1h 循环试验后，整体分析均方根误差有所降低。其中，1hNoblnd 试验在循环过程中的分析均方根误差比 1h 试验互有高低，整体质量略好一些。对背景误差水平相关模型结构（采用五种尺度叠加相关模型）进行改进后，1hNoblndG5 试验在 1900–1908UTC 时段的分析均方根误差比 1hNoblnd 明显降低；再对背景误差水平相关尺度进行改进后，1hHL2D 试验在整个时段的分析均方根误差基本都比其他四组试验有明显降低。

比较五组试验在 2020 年 7 月 19 日 00–12UTC 连续循环过程中五个分析时刻（00、03、06、09 和 12UTC）分析场与各类观测的平均均方根误差随高度的变化情况。从图 9a、b 可以看出，与云导风观测比较 1hHL2D 试验的风场分析均方根误差基本最小，3h 试验风场分析均方根误差在 600 hPa 以下小于 1h、1hNoblnd 和 1hNoblndG5 试验；在中高层 3h、1h、1hNoblnd 和 1hNoblndG5 试验的分析均方根误差差别不显著。

比较分析与飞机报风场观测的均方根误差（图 9c 和 d），3h 试验的分析风场均方根误差显著大于其他试验，1hNoblnd 和 1hNoblndG5 试验的风场分析均方根误差略大于 1h 试验，而 1hHL2D 试验的风场分析均方根误差最小。不同试验的分析与飞机报温度观测的均方根误差在不同高度上有差别较大（图 9e），在 500 hPa 以下，3h 试验的分析温度均方根误差最大，其他三组 1h 循环试验的温度分析均方根误差相差不大；在 500–250 hPa 之间，3h 试验的温度分析均方根误差最小，而 4 组 1h 循环试验结果略有差别。

从分析与雷达径向风的平均均方根误差可以看出（图 9f），整体 3h 试验的分析均方根误差最大；经过更高频循环的 1h 试验，分析均方根误差有所减小，其中 5km 以下的分析均

方根误差显著降低；与 1h 试验相比，1hNoblnd 试验在 5km 以上的分析均方根误差比 1h 试验的有明显降低，在 1-5km 之间分析均方根误差有所增加；采用五种尺度相关模型后，1hNoblndG5 试验的分析均方根误差整体略低于 1hNoblnd 试验；而进一步采用各向异性的水平相关尺度后，1hHL2D 试验的分析均方根误差比其他试验显著减小，分析最优。

综上所述，与多类观测信息比较后可知，1hHL2D 试验的风场分析比其他三组试验更靠近观测；与飞机报和雷达径向风观测比较，3h 试验的分析均方根误差最大。

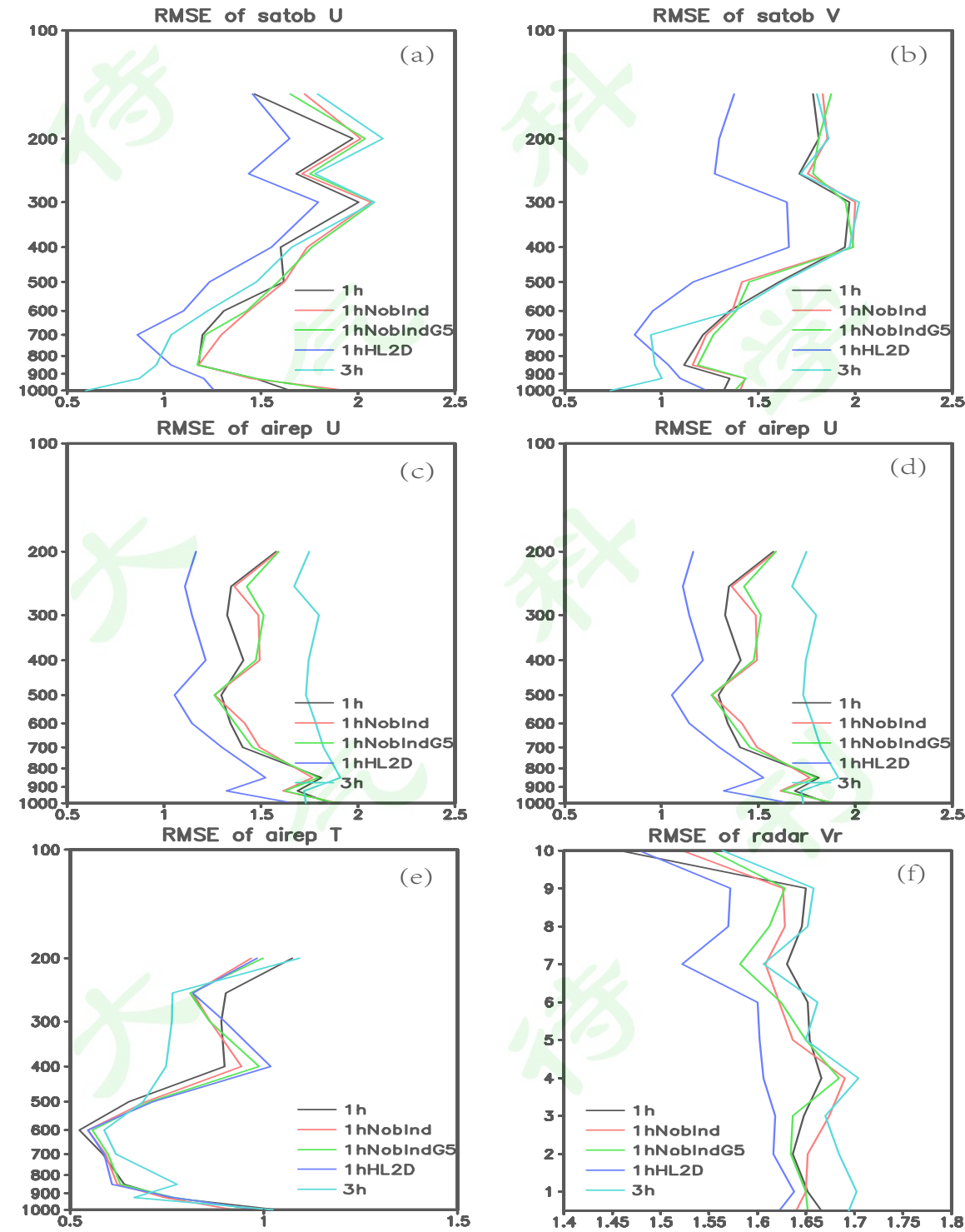


图 9 分析循环过程中分析与各类观测的平均均方根误差，a. SATOB 观测 U (m/s)；b. SATOB 观测 V (m/s)；c. AIREP 观测 U (m/s)；d. AIREP 观测 V (m/s)；e. AIREP 观测 T (K)；f. RADAR 观测 Vr (m/s)

Fig.9 Average standard deviation (unit:m/s) of analyses with observations during cycling data assimilation (a. U-component of satellite retrieved winds, unit:m/s;b.V-component of satellite retrieved winds,unit:m/s; c. U-component of aircraft, unit:m/s; d. V-component of aircraft, unit:m/s; e. temperature of aircraft, unit:K; f. Velocity of radar , unit:m/s)

4.1.2 观测项目标函数分析

上一节比较分析与三类观测资料的均方根误差，本节通过观测项目标函数诊断所有观测对分析的综合影响。3DVar 分析中在目标函数极小化前，观测项目标函数为归一化的观测与背景场差别，即初始观测项目标函数 J_{oXb} 为：

$$J_{oXb} = \frac{1}{2} \sum \frac{d_b^o(d_b^o)^T}{R} \quad (3)$$

其中 d_b^o 为新息向量(观测与背景场的差)， R 为观测误差协方差。目标函数极小化收敛后观测项目标函数为观测与分析场差别，即收敛观测项目标函数 J_{oXa} 为：

$$J_{oXa} = \frac{1}{2} \sum \frac{d_a^o(d_a^o)^T}{R} \quad (4)$$

其中 d_a^o 为分析残差(观测与分析场的差)。由于 J_{oXb} 和 J_{oXa} 为归一化的标量，直接可以反映出不同试验的分析和作为背景场的预报场整体效果。

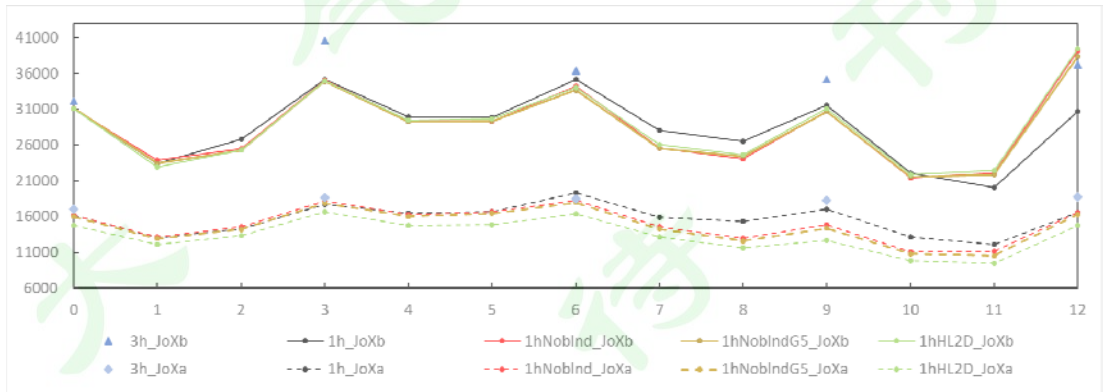


图 10 同化循环过程中各组试验初始和收敛目标函数的变化

Fig.10 Initial and convergent objective functions during cycling data assimilation

3h/1h 循环过程中 J_{oXb} 表征着背景场（3h/1h 预报场）整体靠近观测场的程度，首先比较五组试验的 J_{oXb} 。从图 10 中可以看出整个循环过程 1h 试验的 J_{oXb} 大幅度小于 3h 试验，说明 1h 预报场整体比 3h 循环试验中的 3h 预报场明显接近观测。而 1hNoblnd、1hNoblndG5 和 1hHL2D 试验的 J_{oXb} 相差不大，但略小于 1h 试验的，说明不采用混合尺度方案的 1hNoblnd、1hNoblndG5 和 1hHL2D 试验的 1h 预报场整体略接近观测。分析极小化收敛后，收敛观测项目标函数 J_{oXa} 表征分析整体靠近观测场的程度。从图 10 可以看出各组试验 J_{oXa} 的差别与 J_{oXb} 相似，但 1hHL2D 试验的 J_{oXa} 明显小于 1hNoblnd 和 1hNoblndG5，说明相关模型结构和相关尺度改进后，分析整体更优，更靠近观测。结论与上一节 1hHL2D 试验的分析与观测的均方根误差最小相一致。比较各组试验 J_{oXb} 和 J_{oXa} ，也可以看出经过同化后各组试验的 J_{oXa} 都显著小于 J_{oXb} ，观测目标函数下降了一半左右。

综上所述，逐 1h 循环试验同化了更多的高频观测，但使用高频观测来提高分析质量还需要考虑分析框架的改进。由于在逐小时循环试验中高频次引入全球大尺度预报信息会削弱区域观测资料的影响，在分析框架改进测试中没有采用混合尺度方案。五种高斯叠加水平相关模型的使用比三种高斯叠加水平相关模型更多改变了风场远距离的相关系数，也就是改变了距离风场观测较远处的分析增量大小；而各向异性的相关尺度主要改进了观测风场信息在纬度和经度上传播的远近，这两处改进都使得风场的背景误差水平相关结构更符合实际状况，因而 1hHL2D 试验的风场分析质量有明显提高。

4.2 预报场检验

本文主要针对循环过程中最后一次暖启 19 日 12UTC 时刻预报的动力场、组合反射率和降水进行分析，研究不同频率快速更新循环系统对强对流系统的模拟能力。

4.2.1 动力场预报

文中把五组试验 19 日 12UTC 起报的 3h 预报 850 hPa 风场和温度场与分析场比较。从 19 日 15UTC 风场分析可以看出（图 11a），受低压槽和副热带高压影响，低压槽后偏北风的冷空气与副热带高压西外围西南急流带来的暖空气相遇，产生强对流系统，在湖北和安徽交界产生小低涡，小低涡西南侧冷暖平流交界处存在明显的风场切变线。对比组合反射率实况（图 12）和降水实况（图 13）可以看出，降水云系和强降水主要出现在西南风急流的冷暖平流交界的暖区，也就是槽线和风场切变线以南区域。

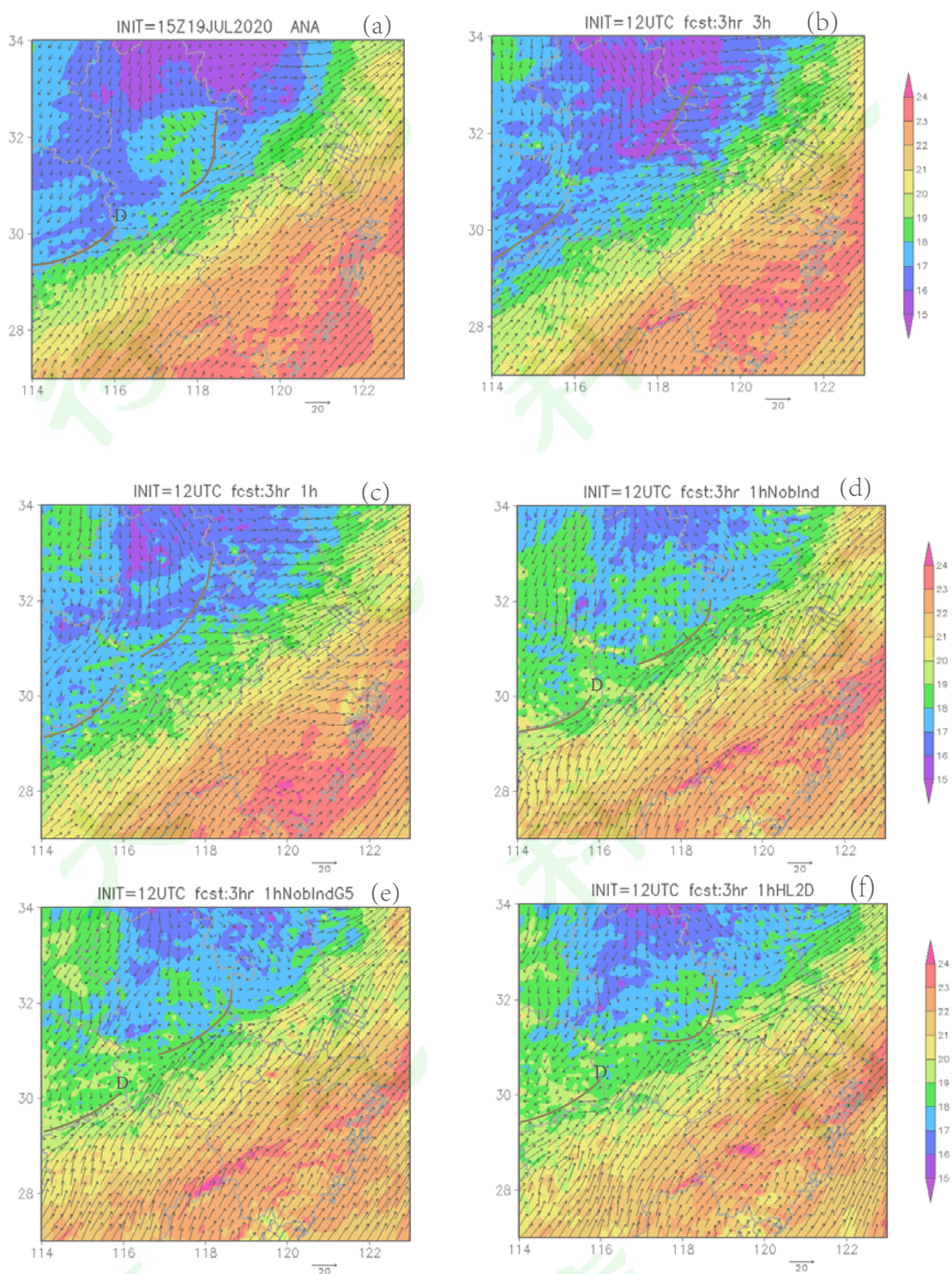


图 11 2020 年 7 月 19 日 15UTC 850 hPa 温度（填色， $^{\circ}\text{C}$ ）与风（矢量箭头， m/s ）的分析场（a），以及 3 小时预报场（b、3h 试验；c、1h 试验；d、1hNoblnd 试验；e、1hNoblndG5 试验；f、1hHL2D 试验）

Fig.11 Temperature (shaded, $^{\circ}\text{C}$) and wind for analysis (a) and 3 hour forecast

(b. 3h; c. 1h; d. 1hNoblnd; e. 1hNoblndG5; f. 1hHL2D) at 15UTC 19 JULY 2020

五组试验的 3h 预报都预报出低压系统、冷暖平流和风场切变线，但强度和位置有所不同。3h 试验和 1h 试验在 18°C 以下的冷区范围更大，低空急流强度较弱，其中 3h 试验风场切变线位置偏北。1hNoblnd、1hNoblndG5 和 1hHL2D 试验的暖平流更强，冷暖平流交界处的温度更高，低空急流强度也更强，因而这三组试验预报的对流活动也更旺盛，与图 12 强降水云系和图 13 强降雨雨带位置相对应。1hNoblnd、1hNoblndG5 和 1hHL2D 试验也准确预报出湖北和安徽交界处的小低涡，风场切变线位置也更接近分析场，其中 1hHL2D 低压槽位置和形状最接近分析。

4.2.2 组合反射率诊断

图 12 为 2020 年 7 月 19 日 13UTC 模式预报的组合反射率和雷达拼图观测的比较，各组试验结果为暖启时刻 19 日 12UTC 开始起报的 1 小时预报。13:00UTC 雷达回波拼图显示（图 12a），在江苏和安徽的南部，以及江西北部存在大范围的降水云系，这一带飑线回波强度可达 45dBZ 以上，30dBZ 以上的主体回波呈东北-西南走向。五组试验基本都预报出主体回波的位置，但都略偏北。其中，逐 3h 循环试验预报的组合反射率在 15dBZ 以上的范围比实况范围更广，预报回波强度偏弱，主体回波在安徽不连续，在主体回波带上零星预报出 30dBZ 以上的组合反射率（图 12b）。1h 试验的组合反射率预报略优于 3h 试验，虽然主体回波依然不连续，在安徽南部的强回波没有预报出来，但在江西北部预报出 45dBZ 以上的强回波区（图 12c）。1hNoblnd 试验基本预报出 45dBZ 以上强回波带，但范围偏广，而且在安徽西南部强回波有中断（图 12d）。1hNoblndG5 试验预报的 45dBZ 以上强回波带在江苏南部范围偏广，而且在江西北部有中断（图 12e）。1hHL2D 试验的组合反射率预报优于其他四组试验，虽然主体回波强度预报偏强，但位置和结构最接近实况（图 12f）。

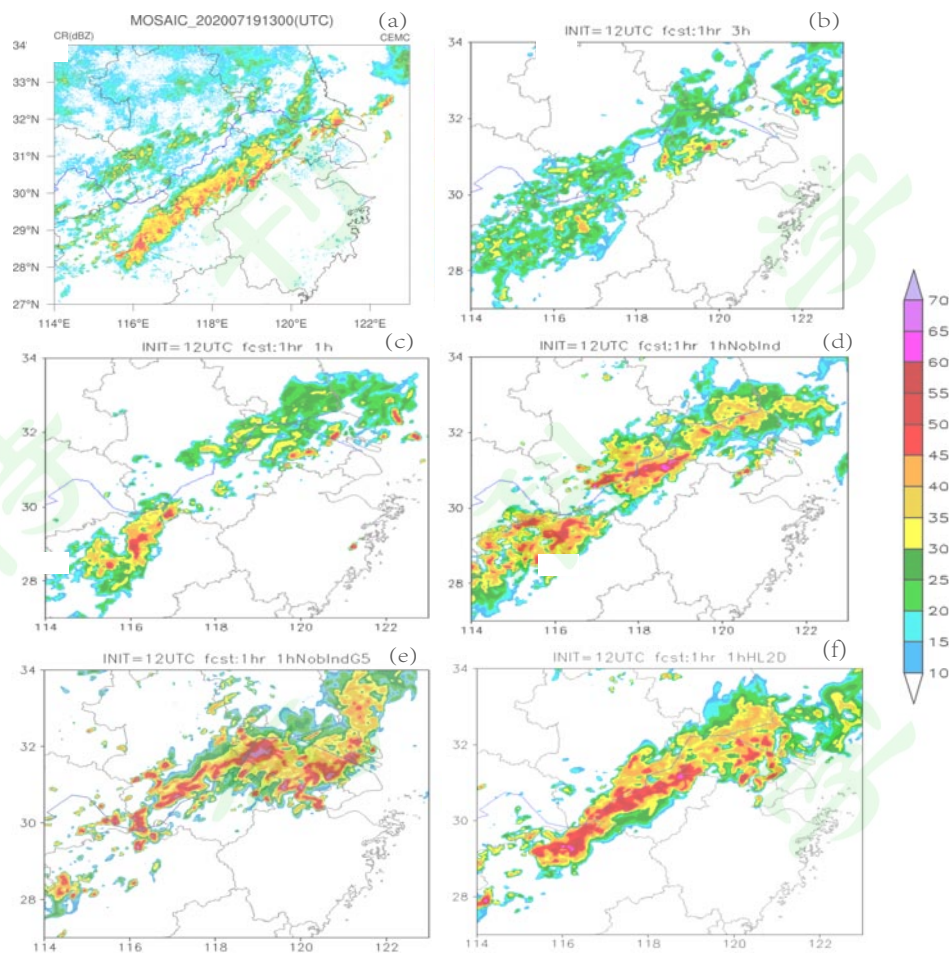


图 12 2020 年 7 月 19 日 13UTC 组合反射率(单位 dBZ)，实况(a)，3h(b)、1h(c)、1hNoblnd(d)、1hNoblndG5(e)和 1hHL2D(f) 试验的 1 小时预报

Fig.12 Composite reflectivity at 13UTC 19 July 2020(Unit:dBZ) observation(a), 1 hour forecasts of 3h(b),1h(c),1hNoblnd(d), 1hNoblndG5(e) and 1hHL2D(e)

4.2.3 降水预报效果

文中主要分析循环最后暖启 12UTC 起报的 12-15UTC 时段 3h 累积降水分布情况。2020 年 19 日 12-15UTC 时段实况降水发生在江苏和安徽南部，以及浙江与江西北部地区，雨带呈东北-西南走向。20mm 以上的主要暴雨带在安徽南部和江西北部，江西北部出现 50mm 以上的特大暴雨（图 13a）。五组试验模拟的雨带位置和走向与实况基本一致，但降水强度有所差别(图 13)。其中 3h 试验降水强度预报最弱，在安徽南部和江西北部只预报到中雨。1h 试验降水预报略好于 3h 试验，预报出江西北部暴雨，但安徽南部暴雨中心没有预报出来。1hNoblnd 和 1hNoblndG5 试验降水预报优于 1h 试验，预报出江苏、安徽南部和江北部的暴雨，但中心强度预报略强，雨带位置略偏北。1hHL2D 试验预报的降水落区、雨带形状最接近实况，只是暴雨预报范围略广，强度偏强。

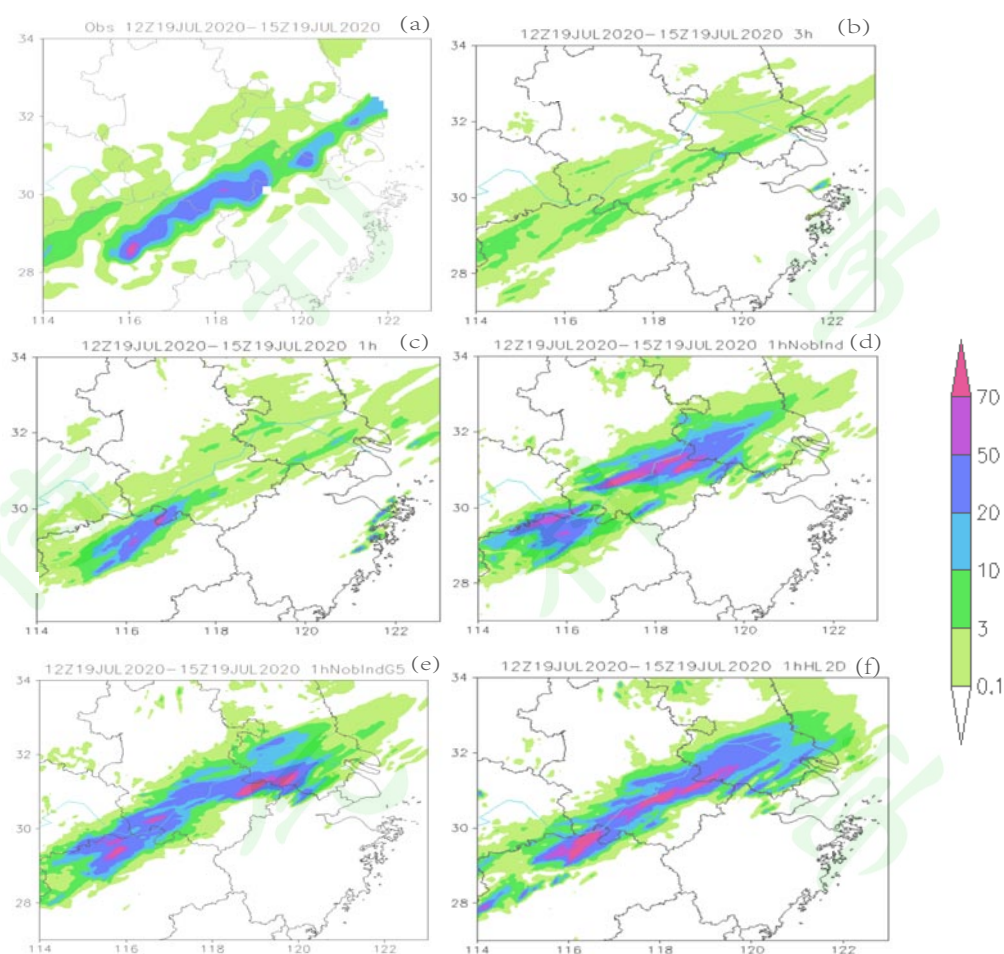


图 13 2020 年 7 月 19 日 12:00–15:00 的累积降水(单位:mm) (a. 实况,
b. 3h, c. 1h, d. 1hNoblnd, e. 1hNoblndG5, f. 1hHL2D)

Fig.13 Accumulated precipitation forecast from 12UTC to 15UTC 19 July 2020(Unit: mm) (a. observation, b. 3h, c. 1h, d. 1hNoblnd, e. 1hNoblndG5, f. 1hHL2D)

综上所述,对于 12–15UTC 的累积降水预报,四组 1h 循环试验的降水预报质量明显好于 3h 试验结果,其中 1hHL2D 试验更准确预报出的暴雨落区,雨带形状也最接近实况,降水预报质量整体最好。

5 结论和讨论

本文在 CMA-MESO 水平 3km 分辨率 3h 循环系统的基础上,建立逐 1h 快速更新循环系统,同时在分析框架中采用五种尺度叠加的高斯相关模型和各向异性的水平相关结构,通过五组循环试验研究不同频率快速更新循环对分析和短临预报的影响,主要得出以下结论:

- (1) 五种尺度叠加的高斯相关模型比三种尺度叠加及单一尺度的高斯相关模型对变量背景误差水平相关系数的描述更加合理,通过采用更多的水平相关尺度参数对远距

离和近距离的相关系数进行调整，可以缓解控制变量近距离相关系数的高估和远距离相关系数的低估，同时导出风场变量的相关结构也更接近样本统计结果。

(2) 对纬向和经向上分别统计背景误差水平相关尺度，非平衡温度、湿度和非平衡势函数以及 U 风场在纬向的水平相关尺度明显大于经向，V 风场在经向的水平相关尺度显著大于纬向。因而背景误差水平相关结构为各向异性，除了 V 风场，其他模式变量信息通常在纬向比经向传播更远。

(3) 针对此次强对流过程的模拟，不同频率的循环试验表明，逐 1h 循环过程能吸收更多的观测信息；进一步通过改进水平相关模型和水平相关尺度，主要使风场变量的背景误差水平相关结构更接近统计结果，其中各向异性相关尺度的使用会较大改变风场观测信息向四周传播的远近，因而 1hHL2D 试验的风场分析在五组试验中最接近观测。

(4) 五组试验对组合反射率和降水的短临预报基本都预报出主体回波和雨带的位置及走向，但 3h、1h 以及 1hNoblnd 和 1hNoblndG5 试验都存在强度预报不足，主体回波不连续或暴雨雨带间断的问题。而 1hHL2D 试验更完整地预报出主体回波和暴雨雨带，虽然强度预报偏强，但降水云系和雨带位置预报最接近实况。

在这次华东强对流过程的短临降水预报中，逐 1h 循环比 3h 循环有优势，但对于长期预报，还需要考察逐 1h 循环的模式预报稳定性和预报效果；同时还需要针对不同尺度天气系统，例如更小尺度的龙卷和大尺度台风系统等进行研究。在高频循环的区域分析中引入全球大尺度信息，引入的全球预报信息会削弱区域观测资料的影响，同时在循环不同时段影响有所不同，因而混合方案还需要进一步改进。逐 1h 循环中更多频次观测信息吸收到模式中，在前 3h 预报时段内变量之间还处于动力热力调整状态，因而 1h 预报场作为下次循环的背景场还没有完全达到变量之间的平衡状态，会造成初始场中有更多噪音的累积。解决初始场噪音问题可以在同化系统中考虑，也可以采用初始化方案。目前在三维变分系统中只考虑风压场之间的平衡，它们的平衡依赖于线性回归关系（王瑞春和龚建东，2012），在逐小时循环中不仅背景误差协方差中的背景误差和相关尺度需要进行重新统计，分析场变量之间的平衡关系还需要重新调整。CMA-MESO 系统采用数字滤波初始化方案缓解初始场噪音问题，但数字滤波方案无法区分有意义的中小尺度气象信息和噪音，因而也可能会滤除分析中有意义的中小尺度信息，未来将采用分析增量更新方案替代数字滤波方案来逐步把观测信息吸收到模式中。

致谢：感谢国家气象中心朱立娟、王丹和万晓敏提供逐小时雷达反射率、风廓线雷达和 GPS

可降水量观测资料。

参考文献 (References)

- Ballard S P, Li Z H, David S, et al. 2016. Performance of 4D-Var NWP-based nowcasting of precipitation at the Met Office for summer 2016. *Q J R Meteorol Soc*, 142:472-487.
- Benjamin S G, Devenyi D, Weygandt S S, et al. 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC[J]. *Mon Wea Rev*, 132: 495-518
- Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2016. A north American hourly assimilation and model forecast cycle: the rapid refresh[J]. *Mon Wea Rev*, 144: 1669-1694
- Benjamin S G, Jamison B D, Moninger W R, et al. 2010. Relative short-range forecast impact from aircraft, profiler, radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and mesonet observations via the RUC hourly assimilation cycle[J]. *Mon Wea Rev*, 138:1319-1343
- Brousseau P, Seity Y, Ricard D, et al. 2016. Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Q J R Meteorol Soc*, 142:2231-2243.
- Chen Dehui, Xue Jishan, Yang Xuesheng, et al. 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): general scientific design[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(22):3433-3445
- Xue Jishan, Zhuang Shiyu, Zhu Guofu, et al. 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional variational data assimilation system of GRAPES[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(22):3446-3457
- Zhang Renhe, Shen Xueshun. 2008. On the development of the GRAPES—a new generation of the national operational NWP system in China[J]. *Chinese science bulletin*, 53(22):3429-3432
- 陈葆德, 王晓峰, 李泓等. 2013. 快速更新同化预报的关键技术综述[J]. *气象科技进展*. 3(2):29-35. Chen Baode, Wang Xiaofeng, Li Hong, et al. 2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 3 (2):29-35(in Chinese)
- 陈子通, 黄燕燕, 万齐林等. 2010. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析[J]. *热带气象学报*, 26 (1):49-54. Chen Zitong, Huang Yanyan, Wan Qilin, et al. 2010. Rapid updating cycle assimilation and forecasting system and its experiments and analysis in flood

- seasons [J]. *J Trop Meteor*, 26(1):49-54 (in Chinese)
- 范水勇, 陈敏, 仲跻芹等.2009.北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估[J].*暴雨灾害*, 28(2):119-125. Fan Shuiyong, Chen Min, Zhong jiqin, et al. 2009. Performance tests and evaluations of Beijing local high-resolution rapid update cycle system [J]. *Torrential Rain Disaster*, 28(2):119-125 (in Chinese)
- 傅娜, 陈葆德, 谭燕等.2013. 基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J]. *气象*, 39(10):1247-1256. Fu Na, Chen Baode, Tan Yan, et al.2013. Time-lag ensemble forecasting experiment and evaluation based on SMB-WARR [J]. *J Trop Meteor*, 39(10):1247-1256(in Chinese)
- 郝民, 徐枝芳, 陶士伟等.2011.GRAPES RUC 系统模拟研究及应用试验[J].*高原气象*, 30(6):1573-1583. Hao min, Xu zhifang, Tao Shiwei, et al.2011. Simulation study and application experiment of GRAPES RUC system [J]. *Plateau Meteorology*, 30(6):1573-1583(in Chinese)
- 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂等. 2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J].*应用气象学报*, 28(1):25-37. Huang Liping, Chen Dehui, Deng Liantang, et al. 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification [J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(1):25-37 (in Chinese)
- 李红莉, 王志斌. 2017.华中区域 LRUC 系统的构建与试验[J].*气象科学*, 37(2):195-204. Li Hongli, Wang Zhibin. 2017. Establishment and evaluation of LRUC in central China [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 37(2):195-204(in Chinese)
- 李佳, 陈葆德, 张旭等. 2017. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷的高分辨快速更新同化预报与分析[J]. *大气科学*, 41(6):1221-1233. Li Jia, Chen Baode, Zhang Xu, et al. 2017. High-resolution rapid refresh analysis and prediction of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 41(6):1221-1233(in Chinese)
- 马旭林, 庄照荣, 薛纪善等.2009.GRAPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展[J].*气象学报*, 67(1):50-60. Ma Xulin, Zhuang Zhaorong, Xue Jishan, et al. 2009. Development of 3-D variational data assimilation system for the nonhydrostatic numerical weather prediction model-GRAPES [J]. *Acta Meteor Sinica*, 67(1):50-60 (in Chinese)
- 童文雪, 李刚, 孙娟珍. 2018.针对对流降水预报的 BJ-RUC 系统 1 小时更新循环方案研究[J].

- 热带气象学报, 2018, 34(2):177-187. Tong Wenxue, Li Gang and Sun Juanzhen. 2018. The design of hourly update BJ-RUC system for improving convective precipitation forecasting [J]. *J Trop Meteor*, 34(2):177-187(in Chinese)
- 王莉莉, 龚建东. 2018. 两种 OI 陆面同化方法在 GRAPES_Meso 模式中的初步应用试验[J]. *气象*, 44(7):857-868. Wang Lili and Gong Jiandong. 2018. Application of two OI land surface assimilation techniques in GRAPES_Meso[J]. *Meteor Mon*, 44(7):857-868(in Chinese)
- 王瑞春, 龚建东, 张林. 2012. GRAPES 变分同化系统中动力平衡约束的统计求解[J]. *应用气象学报*, 23(2):129-138. Wang Ruichun, Gong Jiandong and Zhang Lin. 2012. Statistical estimation of dynamic balance constraints in GRAPES variational data assimilation system [J]. *J Appl Meteor Sci*, 23(2):129-138 (in Chinese)
- 徐枝芳, 郝民, 朱立娟等. 2013. CMA-MESO 系统研发[J]. *气象*, 39 (4) :466-477. Xu Zhifang, Hao Min, Zhu Lijuan, et al. 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS [J]. *Meteor Mon*, 39(4):466-477 (in Chinese)
- 张华, 薛纪善, 庄世宇等. 2004. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验[J]. *气象学报*, 62(1):31-41. Zhang Hua, Xue Jishan, Zhuang Shiyu, et al. 2004. Idea experiments of GRAPES three-dimensional variational data assimilation system [J]. *Acta Meteor Sinica*, 62(1):31-41 (in Chinese)
- 庄照荣, 陈静, 黄丽萍等. 2018. 全球和区域分析的混合方案对区域预报的影响试验[J]. *气象*, 44(12): 1517-1525. Zhuang Z R, Chen J, Huang L P, et al. 2018. Impact experiments for regional forecast using blending method of global and regional analyses [J]. *Meteor Mon*, 44(12): 1517-1525 (in Chinese)
- 庄照荣, 王瑞春, 王金成等. 2019. GRAPES_Meso 背景误差特征及应用[J]. *应用气象学报*, 30(3):316-331. Zhuang Zhaorong, Wang Ruichun, Wang Jincheng, et al. 2019. Characteristics and application of background errors in GRAPES_Meso [J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(3):316-331(in Chinese)
- 庄照荣, 李兴良, 陈春刚. 2021a. 水平相关模型的性质及其在 GRAPES 三维变分系统中的应用 [J]. *大气科学*, 2021, 45(1):229-244. ZHUANG Zhaorong, LI Xingliang, CHEN Chungang. 2021. Properties of Horizontal Correlation Models and Its Application in GRAPES 3DVar System [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 45(1): 229-244. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.20107 (in Chinese)

庄照荣, 李兴良.2021b.尺度叠加高斯相关模型在 CMA-MESO 中的应用[J].[气象学报](#), 79(1):

79-93. Zhuang Zhaorong, Li Xingling.2021. The application of superposition of Gaussian components in CMA-MESO[J]. [Acta Meteorologica Sinica](#), 79(1):79-93 (in Chinese)

庄照荣, 王瑞春, 李兴良.2020.全球大尺度信息在 3km CMA-MESO 系统中的应用[J].[气象学报](#), 78(1):33-47. Zhuang Z R, Wang R C, Li X L. 2020. Application of Global Large Scale Information to GRAEPS RAFS system[J]. [Acta Meteorologica Sinica](#), 78(1):33-47 (in Chinese)